

تاثیر سیم آلیاژ حافظه‌دار بر مقاومت به ضربه سرعت بالای کامپوزیت لایه‌ای الیاف- فلز هوشمند

مسعود خزائی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، تهران، ایران

رضا اسلامی‌فارسانی*

دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

چندلایه‌های الیاف- فلز شامل لایه‌های کامپوزیت و ورق‌های فلزات عموماً سبک هم اکنون کاربرد بسیار گسترده‌ای در صنایع پیشرفته نظیر صنایع هوایی و هوافضایی پیدا کرده‌اند. با معرفی این مواد، پژوهشگران با تلفیق مزایای فلزات و کامپوزیت‌ها و استفاده هم‌زمان آنها در یک سازه‌ی هیبریدی، موفق شدند بر معایب فلزات و کامپوزیت‌ها مانند خوردگی در فلزات و مقاومت ضربه‌ای پایین کامپوزیت‌ها غلبه کنند. یکی از مهم‌ترین بارگذاری‌هایی که چندلایه‌های الیاف- فلز در صنعت به ویژه صنایع هوافضا با آن مواجه هستند، بارگذاری ضربه‌ای است. در این پژوهش تلاش شده با استفاده از خواص استثنايي آلیاژهای حافظه‌دار، مقاومت ضربه‌ای این نوع سازه را افزایش داد. بدین منظور از سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار نیکل- تیتانیوم در حد فاصل بین لایه‌های کامپوزیتی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت با ورق‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ استفاده شد. نتایج آزمایش ضربه‌ی سرعت بالا روی نمونه‌ها حاکی از این است که با جاگذاری سیم، انرژی جذب شده در نمونه و متعاقب آن مقاومت شکست به میزان قابل توجهی افزوده می‌شود اما افزایش تعداد سیم تاثیر چندانی در انرژی جذب شده و مقاومت به ضربه‌ی سازه ندارد.

واژه‌های کلیدی: چندلایه‌ی الیاف- فلز، سیم آلیاژ حافظه‌دار، ضربه‌ی سرعت بالا.

Effect of Shape Memory Alloy Wire on High Velocity Impact Resistance of Smart Fiber Metal Laminate Composite

M. Khazaie

Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

R. Eslami-Farsani

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Fiber metal laminates are now very widely used in advanced industries such as the aerospace industry. After introduction of these materials, researchers had successfully overcome the disadvantages of metals like corrosion and composites materials such as low impact resistance. They combined advantages of metals and composites and used them in a hybrid structure simultaneously. One of the most important loading which a fiber metal laminate in aerospace industry is faced, is high velocity impact loading. In this study, it had been tried to increase impact resistance of fiber metal laminates using the exceptional properties of shape memory alloys. Therefore, nickel-titanium shape memory alloy wires are embedded between layers of basalt fiber reinforced epoxy composite and these layers are entirely covered by two sheets of aluminum type 6061 in top and bottom. The results of high velocity impact tests indicate that by embedding wires, the energy absorbed by the sample and subsequently fracture resistance increases significantly, However, increasing the number of wires does not have significant effect on energy absorption and impact resistance of structure.

Keywords: Fiber Metal Laminates, Shape Memory Alloy Wire, High Velocity Impact.

بار بالاتر، مقاومت ضربه‌ی بهتر و قابلیت تعمیر راحت‌تر دارند، در حالی که کامپوزیت‌ها خواص بسیار خوب خستگی، مقاومت و سفتی بالایی دارند. معایب این دو مانند مقاومت به خستگی و خوردگی نامناسب فلزات و ظرفیت تحمل بار و مقاومت ضربه‌ی پایین کامپوزیت‌ها می‌توانند با ترکیب این دو مرتفع گردند [۴،۵].

رومن استرایکف در سال ۲۰۱۲ یک سری آزمایش ضربه‌ی سرعت پایین روی نمونه‌های FML با مواد تشکیل دهنده‌ی مختلف انجام داد و آسیب ضربه‌ای روی لایه‌ها و اجزای آنها را بررسی کرد. نتیجه‌ی این آزمایش حصول رابطه‌ای بین پیکربندی لایه‌ها با مواد تشکیل دهنده‌ی مختلف و پاسخ به ضربه بود. نتیجه‌ی پایانی این پژوهش این بود که خواص مکانیکی اجزای FML تاثیر مهمی روی مقاومت ضربه خواهند داشت [۶].

هوفت و همکارانش در سال ۲۰۰۳ روی روش تحلیلی برای پیش بینی حد بالستیک و قابلیت جذب انرژی صفحه‌های FML در بارگذاری بالستیک مطالعه کردند [۷]. گوکای و همکارانش در سال

۱- مقدمه

در سال‌های دهه ۵۰ میلادی، هدف مهم در طراحی مواد مورد استفاده در صنایع هوایی ارتقای ویژگی مقاومت در برابر رشد ترک بود [۱]. مواد رقابتی مانند آلیاژهای پیشرفته‌ی آلومینیوم و کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، قابلیت افزایش اثرگذاری در سازه داشتند. این مواد البته مزایا و معایبی هم دارند، از جمله می‌توان به مقاومت خستگی پایین آلومینیوم و خواص ضربه‌ای و مقاومت پسماند پایین کامپوزیت‌ها اشاره کرد. در سال‌های پایانی دهه‌ی ۷۰ ایده‌ی استفاده از هر دو ماده در یک سازه‌ی هیبریدی به منظور غلبه کردن بر معایب هر دو شکل گرفت شد [۲]. چندلایه‌ی الیاف- فلز (FML)، کامپوزیتی هیبریدی بر پایه‌ی لایه‌های نازک آلیاژهای فلزی و صفحات پلیمری تقویت شده با الیاف است [۳]. تکنولوژی FML، خواص و مزایای مواد فلزی و مواد الیافی را ترکیب می‌کند. به طور مثال فلزات ظرفیت تحمل

* Fiber Metal Laminates

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: eslami@kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۰۳

Metals Inc بود. دماهای تبدیل آستنیتی و مارتنزیتی این سیم در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- دماهای استحاله فازی سیم حافظه دار [۱۶]

| دمای پایان مارتنزیت (Mf) | دمای شروع مارتنزیت (Ms) | دمای پایان آستنیت (Af) | دمای شروع آستنیت (As) |
|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| -۶۵ °C | -۴۲/۶۱ °C | ۱۹/۷۱ °C | ۵/۳۵ °C |

در این تحقیق، تعداد سیم حافظه دار در FML به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. بر این اساس، سه مقدار ۲، ۴ و ۸ سیم برای جاگذاری در نمونه پیش‌بینی شده و همچنین نمونه‌ی شاهد بدون سیم حافظه‌دار نیز برای مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده با هم ساخته شد. برای ساخت قسمت کامپوزیتی، ۴ لایه کامپوزیت الیاف بازالت - اپوکسی با روش لایه‌گذاری دستی روی هم قرار داده شده و سیم‌های حافظه‌دار با فاصله‌ی ۱ cm از هم در وسط نمونه و بین لایه‌های سوم و چهارم کامپوزیت جاگذاری شدند.

سیم‌ها قبل از جاگذاری توسط اسپری یخ (که دمایی در حدود ۳۰ °C- در سطح سیم به طور یکنواخت ایجاد می‌کند) تحت استحاله‌ی مارتنزیتی قرار گرفتند و وارد فاز مارتنزیتی - شدند. این سیم‌ها در ادامه و پس از جاگذاری در نمونه با دمایی پخت رزین وارد فاز آستنیتی می‌شوند.

در شکل ۱ نمایی از فیکسچر ساخت نمونه و مکانیزم اعمال پیش‌کرنش، در شکل ۲ نمایی از مراحل ساخت نمونه و در شکل ۳ طرحواره نمونه‌ی ساخته شده مشخص شده است.



شکل ۱- فیکسچر ساخت نمونه و مکانیزم اعمال پیش‌کرنش



شکل ۲- نمایی از مراحل ساخت نمونه

برای آزمایش نمونه‌ها از دستگاه ضربه سرعت بالای دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی استفاده شد. گلوله‌ی مورد استفاده به قطر ۲۱/۵ mm و جرم ۲۷ g با سرعت شلیک اولیه-

۲۰۰۶ ویژگی‌های ضربه‌ای و مقاومت ضربه را روی FML مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. کنترل و همکارانش در سال ۲۰۱۰ روی موضوع استفاده از صفحات الیافی حافظه‌دار نیکل تیتانیوم و کامپوزیت الیاف کربن به منظور تولید FML هوشمند مطالعه کردند [۹]. خلیلی و همکارانش در سال ۲۰۰۷ در مورد تأثیر بعضی پارامترهای مهم در پاسخ به ضربه‌ی سرعت پایین صفحات کامپوزیت هیبریدی جدار نازک با سیم حافظه‌دار مطالعه کردند. تأثیر سیم حافظه‌دار روی نیروی تماسی، پیچش، تنش و کرنش درون صفحه‌ای سازه بررسی شد. نتایج حاکی از این است که پارامترهای فیزیکی مانند درصد حجمی SMA، پیش‌کرنش، جهت‌گیری الیاف در کامپوزیت، جرم و سرعت ضربه زنده و نسبت طول به ضخامت صفحه مهم‌ترین فاکتورها برای فرآیند ضربه در طراحی سازه بر این اساس می‌باشد [۱۰].

اسکروتون و همکارانش در سال ۲۰۰۱ طی پژوهشی نشان دادند که افزایش تنش بازیابی در یک سازه‌ی هیبریدی که از سیم حافظه‌دار در آن استفاده شده، با دما رابطه‌ی مستقیم ولی با پیش‌کرنش رابطه‌ی معکوس دارد [۱۱]. روجرز و همکارانش در سال‌های اولیه‌ی پیدایش ایده‌ی کامپوزیت‌های حافظه‌دار روی این مواد مطالعه کردند. آن‌ها در ابتدا روی مدل‌سازی اثر حافظه‌داری ناشی از تغییر فاز پس از اعمال حرارت مطالعه کردند و روابطی برای تنش، کرنش و دمایی الیاف حافظه-دار ارائه دادند [۱۲].

شیماموتو و همکارانش در سال ۲۰۰۲ به فکر استفاده از الیاف حافظه‌دار به منظور کنترل و ارتقای مقاومت ماده افتادند. در این پژوهش رفتار چقرمگی شکست ماده در نوک ترک، بیانگر تأثیرگذاری الیاف حافظه‌دار بوده و نتایج نشان داد که استفاده از الیاف حافظه‌دار در کامپوزیت باعث کاهش تمرکز تنش نوک ترک شده و همچنین مقدار K_{Ic} (چقرمگی شکست) با افزایش پیش‌کرنش افزوده می‌شود [۱۳].

ژانگ و نی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های الیافی تقویت شده با سیم حافظه‌دار را همراه با سیم‌های کوتاه و ذرات الیاف حافظه‌دار بررسی نمودند. تئوری آنها بر پایه‌ی نظریه هالپین-سای می‌باشد. آن‌ها دریافتند با افزودن سیم حافظه‌دار به رزین مدول ذخیره‌سازی آن چند برابر بیشتر می‌شود و فرکانس طبیعی افزایش پیدا می‌کند [۱۴، ۱۵].

پژوهش‌های پیشین بر استفاده از الیاف حافظه‌دار در کامپوزیت و همچنین بارگذاری سرعت بالا در FML متمرکز بوده است. بر این اساس، در این پژوهش تلاش بر این است که تأثیر حضور سیم حافظه-دار و پدیده‌ی اثر حافظه‌داری در بارگذاری سرعت بالا روی FML بررسی شود و ضمن ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و آزمایش ضربه‌ی سرعت بالا روی آنها، اثرات مثبت و منفی سیم حافظه‌دار در این حالت مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

برای ساخت لایه‌ی کامپوزیتی FML از الیاف بازالت و رزین اپوکسی EPON 828 با هاردنر ۱۰٪ و برای قسمت فلز نمونه از ورق آلومینیوم الیافی ۶۰۶۱ با ضخامت ۰/۵ mm استفاده شد. سیم حافظه‌دار استفاده شده از نوع سیم نیکل-تیتانیوم با ضخامت ۰/۴ mm ساخت شرکت Highland

$$E_{abs} = \frac{1}{2} m_p V \quad (2)$$

در معادله‌ی (۱)، V_b نشان دهنده‌ی سرعت حد بالستیک، V_i سرعت اولیه، V_r سرعت ثانویه و در معادله‌ی (۲)، E_{abs} نشان دهنده‌ی انرژی جذب شده و m_p نشان دهنده‌ی جرم گلوله است [۱۷]. سرعت حد بالستیک، حداقل سرعتی از گلوله است که بتواند در صفحه‌ی مورد نظر نفوذ کامل داشته باشد. جدول ۴، مقادیر سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده‌ی نمونه‌ها را مطابق روابط (۱) و (۲) مشخص می‌کند.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود با جاگذاری سیم در نمونه، افزایش انرژی جذب شده و سرعت بالستیک مشاهده می‌شود که علت این امر، جذب انرژی بیشتر توسط نمونه است. با جاگذاری سیم، مدول الاستیسیته‌ی نمونه افزایش می‌یابد و باعث افزایش تنش (قانون هوک) در نمونه می‌شود و با این افزایش، نمونه‌ها در مقابل ضربه‌ی ناشی از گلوله مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. در پژوهش دیگری که کنتول و ویلانوا [۱۸] در سال ۲۰۰۳ روی بارگذاری ضربه سرعت بالا روی چندلایه الیاف- فلز انجام دادند، فوم آلومینیومی به عنوان هسته استفاده شد و در لایه چینی هم از ۴ ورق آلومینیوم استفاده شد، بالاترین انرژی جذب شده بین نمونه‌های آزمایش شده ۱۲۹ J است که در مقایسه با نتایج این آزمایش به مراتب مقدار پایین تری است.

شکل ۳، نمای پشت و جلوی نمونه‌ی BFML0W، شکل ۴، نمونه- BFML2W، شکل ۵، نمونه‌ی BFML4W و شکل ۶، نمونه BFML8W را پس از شلیک گلوله نشان می‌دهد. خطوطی که در شکل‌ها مشخص است محل قرارگیری سیم‌های حافظه‌دار است. در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نمودارهای تغییرات سرعت بالستیک و انرژی جذب شده نسبت به تعداد سیم حافظه‌دار نشان داده شده است.

ی 122 m/s انتخاب شد. برای ساده سازی، نام نمونه‌ها به صورت جدول ۲ انتخاب شدند.

جدول ۲- نامگذاری نمونه‌ها

| نام نمونه | کد نمونه* |
|-------------------------|-----------|
| نمونه‌ی بدون سیم (شاهد) | BFML0W |
| نمونه‌ی ۲ سیم | BFML2W |
| نمونه‌ی ۴ سیم | BFML4W |
| نمونه‌ی ۸ سیم | BFML8W |

* اعداد قبل از حرف W (Wire) بیانگر تعداد سیم است.
BFML = Basalt Fiber Metal Laminate

۳- نتایج و بحث

جدول ۳، نتایج خروجی دستگاه ضربه شامل سرعت ثانویه‌ی گلوله پس از عبور از نمونه و سوراخ کردن آن را نشان می‌دهد. پس از به دست آوردن این مقادیر، باید مقادیر سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه شده تا بتوان رفتار نمونه‌ها را در مقابل بارگذاری ضربه‌ی سرعت بالا تحلیل کرد.

جدول ۳- سرعت ثانویه نمونه‌ها

| کد نمونه | BFML0W | BFML2W | BFML4W | BFML8W |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| سرعت ثانویه (m/s) | ۸۸ | ۶۹ | ۷۳ | ۷۰ |

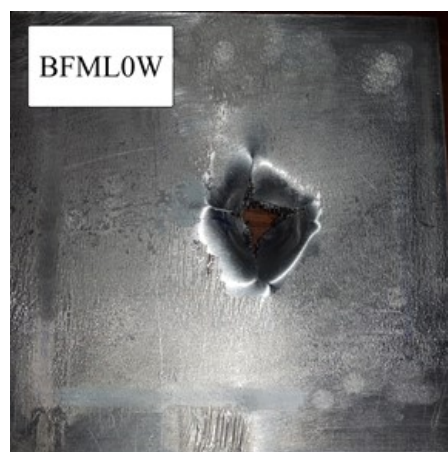
$$V_b = \frac{m/s}{\sqrt{v_i^2 - v_r^2}} \quad (1)$$

جدول ۴- مقادیر سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده‌ی نمونه‌ها

| کد نمونه | BFML0W | BFML2W | BFML4W | BFML8W |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| سرعت حد بالستیک (m/s) | ۸۴/۴۹ | ۱۰۰/۶۱ | ۹۷/۷۴ | ۹۹/۹۱ |
| انرژی جذب شده (J) | ۹۶/۳۷ | ۱۳۶/۶۵ | ۱۲۸/۹۶ | ۱۳۴/۷۵ |



(الف)



(ب)

شکل ۳- الف) نمایی از پشت نمونه‌ی BFML0W پس از شلیک گلوله و عبور گلوله از نمونه. ب) نمایی از جلوی نمونه BFML0W

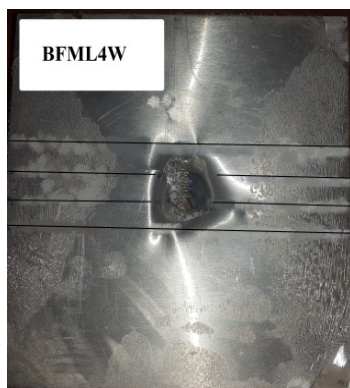


(ب)



(الف)

شکل ۴- الف) نمایی از پشت نمونه‌ی BFML2W پس از شلیک گلوله و عبور گلوله از نمونه. ب) نمایی از جلوی نمونه BFML2W. خطوط موازی نشان دهنده‌ی محل قرارگیری سیم‌هاست



(ب)



(الف)

شکل ۵- الف) نمایی از پشت نمونه‌ی BFML4W پس از شلیک گلوله و عبور گلوله از نمونه. ب) نمایی از جلوی نمونه BFML4W. خطوط موازی نشان دهنده‌ی محل قرارگیری سیم‌هاست.

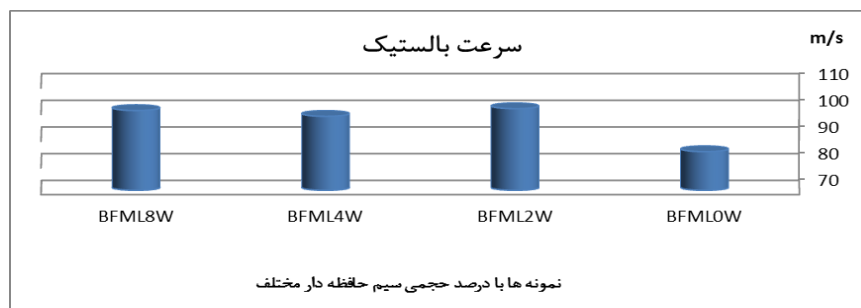


(ب)

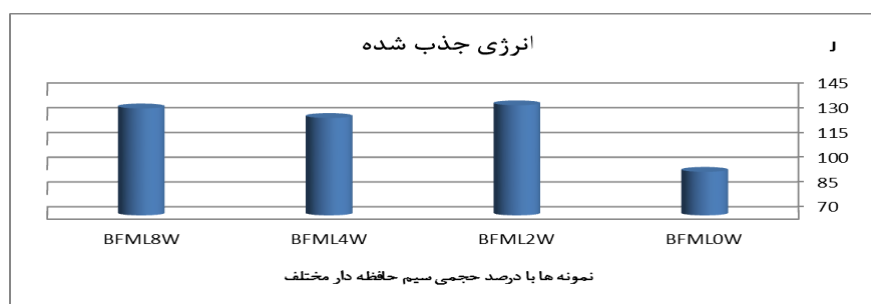


(الف)

شکل ۶- الف) نمایی از پشت نمونه‌ی BFML8W پس از شلیک گلوله و عبور گلوله از نمونه. ب) نمایی از جلوی نمونه BFML8W.



شکل ۷- نمودار تغییرات سرعت بالستیک نسبت به تعداد سیم



شکل ۸- نمودار تغییرات انرژی جذب شده نسبت به تعداد سیم



شکل ۹- مساحت تخریب نمونه BFML0W



شکل ۱۰- مساحت تخریب نمونه BFML2W



شکل ۱۱- مساحت تخریب نمونه BFML4W

همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود مقادیر سرعت بالستیک و انرژی جذب شده برای نمونه‌ی ۲ سیم از دو نمونه‌ی دیگر بالاتر است، این نتیجه به دلیل غیر یکنواخت بودن و گسستگی خواص مکانیکی قطعه در اثر جاگذاری تعداد زیاد سیم‌ها است. گسستگی به این معنی است که خواص مکانیکی قطعه در هر نقطه متفاوت است. با توجه به این‌که با افزایش تعداد سیم در قطعه این گسستگی بیشتر می‌شود، خواص مکانیکی از جمله مقاومت در برابر ضربه هم متعاقباً با افت مواجه می‌شود.

با مقایسه‌ی درصد انرژی افزایش انرژی جذب شده در نمونه‌های با سیم حافظه‌دار نسبت به نمونه‌ی بدون سیم در جدول ۵ مشاهده می‌شود که نمونه‌ی ۲ سیم به علت گسستگی کمتر نسبت به ۴ و ۸ سیم، مقاومت بهتری نشان می‌دهد. در واقع، با افزایش تعداد سیم جاگذاری شده، تاثیر منفی درصد حجمی که گسستگی خواص مکانیکی است، بر اثر مثبت آن که افزایش مدول الاستیسیته است، غلبه می‌کند و مقاومت ضربه‌ی نمونه با افزایش درصد حجمی سیم حافظه‌دار ارتقا پیدا نمی‌کند.

جدول ۵- درصد افزایش انرژی جذب شده نسبت به نمونه شاهد

| کد نمونه | درصد افزایش انرژی جذب شده نسبت به نمونه شاهد (m/s) |
|----------|--|
| BFML0W | ۰ |
| BFML2W | ۴۱ |
| BFML4W | ۳۳ |
| BFML8W | ۴۰ |

نمونه‌ی ۲ سیم به علت گسستگی کمتر نسبت به ۴ و ۸ سیم، مقاومت بهتری نشان می‌دهد. در واقع، با افزایش تعداد سیم جاگذاری شده، تاثیر منفی درصد حجمی که گسستگی خواص مکانیکی است، بر اثر مثبت آن که افزایش مدول الاستیسیته است، غلبه می‌کند و مقاومت ضربه‌ی نمونه با افزایش درصد حجمی ارتقا پیدا نمی‌کند.

در نمای روبروی سه نمونه‌ی مورد نظر که در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، بیشترین ناحیه‌ی تخریب در محدوده‌ی سیم‌های میانی که به محل اصابت گلوله نزدیک هستند، رخ می‌دهد. این بدان معنی است که در نمونه‌ی ۸ سیم، سیم‌های کناری نقشی در بهبود خاصیت مقاومت ضربه‌ای ندارند.

در شکل‌های ۹ تا ۱۲ به ترتیب مساحت تخریب هر ۴ نمونه مشخص شده است. مساحت تخریب با جاگذاری سیم بیشتر شده، ولی با افزایش تعداد سیم کاسته می‌شود. مساحت تخریب شده‌ی بیشتر حاکی از این موضوع است که نمونه، انرژی بیشتری در اثر اصابت گلوله جذب کرده است.

Composites Science and Technology 66, No. 13, 2306-2316, 2006.

[6] Starikov, Roman, Assessment of impact response of fiber metal laminates, International Journal of Impact Engineering 59, pp. 38-45, 2013.

[7] Fatt Michelle S., Hoo, Chunfu Lin, Duane Revilock M., and Dale A., Hopkins, Ballistic impact of GLARE™ fiber-metal laminates, Composite structures 61, No. 1, pp. 73-88, 2003.

[8] Wu Guocai, Jenn-Ming Yang, and Thomas Hahn H., The impact properties and damage tolerance and of bi-directionally reinforced fiber metal laminates, Journal of materials science 42, No. 3, pp. 948-957, 2007.

[9] Kuang K. S. C., Quek S. T. and Cantwell W. J., Morphing and control of a smart fibre metal laminate utilizing plastic optical fibre sensor and Ni-Ti sheet, In Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials. 2009.

[10] Khalili S. M. R., Shokuhfar A., Malekzadeh K. and Ashenai Ghasemi F., Low-velocity impact response of active thin-walled hybrid composite structures embedded with SMA wires, Thin-Walled Structures 45, No. 9, pp. 799-808, 2007.

[11] Zheng Y. J. Jan Schrooten, Kelly A. Tsoi, and Rudy Stalmans. "Thermal response of glass fibre/epoxy composites with embedded TiNiCu alloy wires, Materials Science and Engineering: A 335, No. 1, pp. 157-163, 2002.

[12] Giurgiutiu, Victor, Craig A. Rogers, and Jasper Zuidervaart, Design and preliminary tests of an SMA active composite tab, In Smart Structures and Materials' 97, International Society for Optics and Photonics, pp. 206-216, 1997.

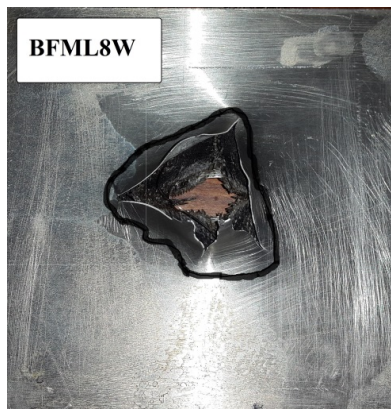
[13] Shimamoto, Akira, Hiroshi Ohkawara, and Fumio Nogata, Enhancement of mechanical strength by shape memory effect in TiNi fiber-reinforced composites, Engineering fracture mechanics 71, No. 4, pp. 737-746, 2004.

[14] Zhang R. X. Ni Q. Q. Natsuki T. and Iwamoto M., Mechanical properties of composites filled with SMA particles and short fibers, Composite Structures, Vol. 79, No. 1, pp.90-96, 2007.

[15] Ni, Q. Q. Zhang, R. X. Natsuki, T. and Iwamoto, M., Stiffness and vibration characteristics of SMA/ER3 composites with shape memory alloy short fibers, Composite structures, Vol. 79, No. 4, pp. 501-507, 2007.

[16] Brosens, Veronique, Ines Ghijssels, Martine Voet, Pieter Leemans, Jan Van Humbeeck, and Guy Willems, Transformation behaviour, bending properties and surface quality of 22 commercial nickel-titanium wires: A batch-to-batch evaluation, British Journal of Medicine and Medical Research 2, No. 4, pp. 597,2012.

[17] Langdon G. S., Y. Chi G. N. Nurick and P. Haupt, Response of GLARE® panels to blast loading, Engineering Structures 31, No. 12, pp. 3116-3120, 2009.



شکل ۱۲- مساحت تخریب نمونه‌ی BFML8W

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر سیم حافظه‌دار در بارگذاری ضربه-ای سرعت بالا روی چندلایه‌ی الیاف-فلز پرداخته شد و تاثیر تعداد سیم جاگذاری شده در بین لایه‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نهایی به شرح زیر است:

- جاگذاری سیم حافظه‌دار بین یک چندلایه‌ی کامپوزیتی باعث بالا رفتن مدول الاستیسیته‌ی قطعه می‌شود. به همین دلیل نمونه‌های ۲، ۴ و ۸ سیم انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌ی بدون سیم جذب کردند و مقاومت بهتری در برابر گلوله نشان دادند.
- جاگذاری تعداد زیاد سیم حافظه‌دار باعث از بین رفتن پیوستگی خواص مکانیکی در سطح قطعه می‌شود. این ناپیوستگی باعث تغییر در مقاومت ضربه شده و نمونه‌های ۴ و ۸ سیم پاسخ بهتری از نمونه‌ی ۲ سیم در برابر بارگذاری نشان ندادند.
- سیم‌های حافظه‌دار که دور از محل اصابت گلوله قرار گرفته‌اند تاثیری در انرژی جذب شده‌ی قطعه ندارند و با توجه به نتایج قبلی و همچنین هزینه و زمان تولید قطعات با تعداد زیاد سیم، می‌توان نمونه‌هایی با تعداد سیم‌های کمتر تولید کرد.
- با توجه به نتایج تحقیق، می‌توان به کاربرد بسیار مناسب این سازه‌ها در صنایع هوایی و دریایی پی برد. در بدنه‌ی کشتی یا هواپیما با بکارگیری کامپوزیت الیاف-فلز هوشمند، مقاومت سازه در برابر ضربه‌ی ناشی از اصابت پرنده یا اشیای دیگر بالا می‌رود.

۵- منابع

- [1] Sinmazçelik, Tamer, Egemen Avcu, Mustafa Özgür Bora, and Onur Çoban. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. Materials & Design 32, No. 7, pp. 3671-3685, 2011.
- [2] Voglesang L. B. and Vlot A., Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures, Journal of Materials Processing Technology 103, No. 1, pp. 1-5, 2000
- [3] Cortes P. and Cantwell W. J., The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre-metal laminates, Composites Science and Technology 66, No. 13, pp. 2306-2316, 2006.
- [4] Alderliesten, René, and Rinze Benedictus. Fiber/metal composite technology for future primary aircraft structures, Journal of Aircraft 45, No. 4, pp.1182-1189, 2008.
- [5] Cortes, P., and W. J. Cantwell, The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre-metal laminates,